

DOI: 10.11779/CJGE201609021

含应力旋转路径对软黏土小应变刚度影响试验研究

严佳佳¹, 傅了一², 朱剑锋^{3*}, 林清辉⁴

(1. 中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311120; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 4. 台州职业技术学院建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要: 利用配备高精度局部位移传感器的空心圆柱扭剪仪对杭州软黏土开展了系列应力旋转路径条件下的试验研究, 包括: 大主应力沿不同角度的定向剪切, 不同剪应力水平下大主应力单纯连续旋转后定向剪切以及大主应力往复循环旋转后定向剪切 3 类典型应力路径, 并考虑了中主应力系数及剪应力水平的影响。重点分析应力旋转路径对软黏土小应变刚度特性的影响。主要结论有: 在不同的复杂应力条件下软黏土的刚度均受应变大小的影响, 应变小于 0.01% 时软黏土的刚度很大, 在 0.01%~0.1% 范围内刚度迅速衰减; 在定向剪切条件下剪切方向对软黏土小应变剪切刚度的影响并不明显, 而中主应力系数的影响比较显著; 在主应力单纯旋转阶段软黏土会因不同的剪应力幅值产生不同程度的应变累积, 继而对土体的小应变刚度的影响程度也不同; 主应力往复循环旋转虽然也会产生前期累积应变, 但土体在后期定向剪切阶段的初始刚度并未显著衰减, 说明应力旋转模式对小应变刚度也有很大影响。

关键词: 应力旋转; 软黏土; 小应变刚度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)09-1727-07

作者简介: 严佳佳(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事复杂应力条件土力学试验和理论研究。E-mail: yanjia.01@163.com。

Experimental study on influence of stress rotation on small-strain stiffness behavior of soft clay

YAN Jia-jia¹, FU Liao-yi², ZHU Jian-feng³, LIN Qing-hui⁴

(1. Power China, Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311120, China; 2. Coastal and Geotechnical Research Center of Zhejiang University, Hangzhou 310058, China. 3. Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 4. Department of Architecture and Civil Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China)

Abstract: A series of principal stress rotation tests are carried out on soft clay using a hollow cylinder apparatus equipped with high censors. The stress paths with fixed principal stress directions, pure principal stress rotation and cyclic principal stress rotation are studied. The influences of the intermediate principal stress parameter (b) and shear stress level (q) are taken into consideration. The effect of stress rotation on the small strain stiffness of soft clay is studied in particular. The test results indicate that the stiffness of soft clay is affected by the magnitude of strain under complex stress condition. The stiffness is relatively higher when the strain is smaller than 0.01%, and the stiffness decreases quickly during 0.01%~0.1%. The influence of shearing direction on the small strain stiffness is unobvious, while the influence of b is obvious. The influence of the pure principal stress rotation on the small strain stiffness of soft clay is dependent on the strain induced by the pure principal stress rotation. Strain is also accumulated during cyclic principal stress rotation, while the stiffness of soft clay is less influenced during fixed direction shearing, which indicates that the mode of the principal stress rotation also has significant effect on the small strain stiffness of soft clay.

Key words: principal stress rotation; soft clay; small strain stiffness

0 引言

已有现场实测数据表明, 实际工程中地基土体的应变值都很小^[1-2], Burland^[1]通过大量实测数据的反分析发现, 根据实测数据得到的土体刚度远大于室内试验值, 从而提出了土体小应变刚度的概念。土体小应变刚度

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015M571872); 广东省产学研合作院士工作站(2013B090400024); 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放基金项目(KLE-TJGE-B1501); 国家自然科学基金项目(51608477; 51409142)

收稿日期: 2015-08-04

***通讯作者** (E-mail: zhu Jianfeng@163.com)

参数是正确预测基坑、隧道等开挖过程与邻近地下设施相互作用的重要参数,考虑土体小应变刚度特性的计算结果与实测数据更吻合,也能更好地反映地基和地下结构变形的规律^[3-5]。Schädlich 等^[3]分析的基坑算例中不考虑土体小应变刚度计算的地表沉降比考虑小应变刚度计算得到的结果偏大 30% 左右。

已有的试验结果表明在小应变范围内土体主要力学特性表现为刚度很大,随应变累积急剧衰减,高度非线性,各向异性以及依赖应力历史及路径等。张培森^[6]研究了模拟基坑和隧道开挖两种应力路径旋转对砂土剪切模量的影响,表明小应变范围内剪切模量的初始值随历史应力路径与当前应力路径夹角的增加而增大。Lings 等^[7]对 Gault 黏土进行了系列应力路径三轴试验,发现 $p-q$ 平面内应力路径旋转对土体小应变刚度的有显著影响。谷川等^[8]对饱和软黏土进行的小应变试验研究表明,不论排水和不排水条件下,应力路径对饱和软黏土的割线模量都有显著的影响,尤其在小应变范围内,割线模量表现出更强的应力路径依赖性。Atkinson 等^[9]指出土体模量受近期应力历史的影响显著,最主要的两个影响因素是当前应力状态的持续时间以及应力路径方向的突然转变。

Jardine^[2]将对影响土体小应变特性的因素归纳为土体的自然特性和当前应力状态两类。Benz^[10]分析总结了小应变刚度特性影响因素包括应变水平、围压、孔隙比、土体塑性、超固结比、应力历史、应变速率等。张培森^[11]对国内外有关小应变条件下土体刚度的研究成果进行了分析,总结了应力历史及应力状态、有效应力路径及其方向、加载速率及蠕变周期以及土体各向异性为影响土体小应变刚度的主要因素。

应力方向的旋转是岩土工程中的典型应力路径,隧道、基坑等土体开挖过程中都会引起地基土体主应力方向的显著旋转。已有大量研究结果表明应力方向旋转路径对土体应力-应变-强度特性有显著影响^[12-16],但其对土体小应变刚度特性影响的研究还较少。为了能更好地研究主应力旋转等复杂应力路径下土体小应变刚度特性,本文开展了一系列主应力旋转路径下原状软黏土试验,利用高精度局部位移传感器测量小应变范围内软土应变值。本文小应变为小于 0.1% 范围的应变值。重点研究应力方向旋转路径对软黏土小应变刚度特性的影响,分析中主应力系数、剪应力值、主应力方向以及应力旋转方式等影响因素。

1 试验仪器及土样

本文采用浙江大学 5 Hz 空心圆柱扭剪仪 (HCA) 开展系列应力旋转路径下的试验研究。通过对空心圆

柱试样施加独立控制的轴力、扭矩以及内、外压力来实现对作用于试样单元体上 3 个主应力值和大主应力方向的独立控制。有关试验仪器的工作原理及详细介绍参见文献[16]。该仪器在试样顶部配备了高精度 LVDT 局部位移/角度传感器,轴向应变和扭剪应变测量精度为 10^{-5} ,受复杂加载路径的影响,客观上试样整体应变与局部应变开展存在一定差异(特别是当试样破坏时)。虽然试样整体轴向和切向应变是直接测量的,但是整体径向应变则是根据轴向应变,体变等其他应变分量换算求解得到,为了测定试样局部变形及验证整体变形的准确性和合理性,配备了测定试样局部变形的位移传感器,精度为 10^{-5} (如图 1)。

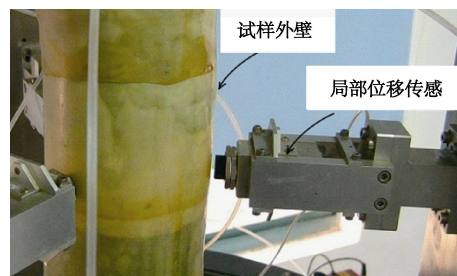


图 1 水下局部非接触式位移传感器

Fig. 1 Underwater strain sensor

该空心圆柱扭剪仪的控制及量测系统示意图如图 2 所示。文献[16]对该局部变形实测结果与换算结果的对比研究表明两者十分接近,尤其是在应变很小时。此外为了尽可能减小乳胶膜对试样应力应变结果的影响,试验所用乳胶膜厚度为 0.1 mm。

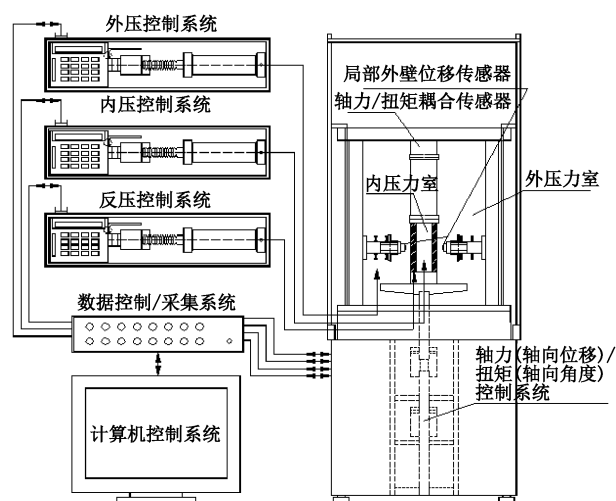


图 2 ZJU-HCA 控制、量测系统示意图

Fig. 2 Control and measure system of ZJU-HCA

试验土样为取自杭州某基坑工地的原状黏土试块,取土位置位于地表以下约 4 m 深处。采用专用取土工具在现场手工切取 30 cm×30 cm×40 cm (长宽高) 左右的原状黏土块,装入木盒内覆上湿布再用塑料薄膜密封后再放入泡沫塑料桶内运回实验室存放。

试验时取出土块, 小心修剪外部土体切取试块中心部分, 采用专用黏土制样设备将试块精修成 200 mm×100 mm×60 mm 的空心试样, 从而尽可能减少运输和取土对试样的扰动。原状黏土基本物理力学参数列于表 1, 试样为较典型的淤泥质粉质黏土。制备完成和剪切结束时的典型试样如图 3 所示。

表 1 原状黏土物理参数

Table 1 Physical parameters of intact soft clay

比重	液限 /%	塑限 /%	塑性指 数	密度 /(g·cm ⁻³)	含水 率/%
2.68	49.8	22.8	27	1.78	42.2



图 3 制备完成和剪切结束时的试样
Fig. 3 Hollow cylinder clay specimens

2 试验方案设计

为了研究含应力方向旋转路径对软黏土小应变刚度特性的影响, 结合实际工程中应力静态旋转与动态旋转等路径。本文试验路径主要分为沿与沉积方向成不同角度的定向剪切试验; 经历不同剪应力条件下大主应力单纯连续旋转后的剪切试验以及经历大主应力往复旋转后的剪切试验。本文的试验均为等向固结不排水试验。下面分别对各应力路径进行介绍。

2.1 定向剪切路径

定向剪切试验主要研究大主应力与土体沉积方向成不同角度时软黏土在剪切过程中的小应变刚度特性, 同时也分析中主应力系数 b 对土体刚度的影响, 并与后两组试验研究的结果进行对照。应力路径具体参数设置见表 2。

表 2 定向剪切试验方案

Table 2 Shearing tests with fixed direction

编号	试验参数		编号	试验参数	
	b	$\alpha/(^{\circ})$		$\alpha/(^{\circ})$	b
S101	0	0	S201	0	0
S102		30	S202		0.25
S103		45	S203		0.50
S104		60	S204		0.75
S105		90	S205		1.00

通过同时控制作用于试样的轴力、扭矩以及内、

外压力来实现相应的应力路径。试样固结完成后, 先调整中主应力系数 b 和大主应力方向角 α 到设定值, 此时保持 $q=5$ kPa, $p=150$ kPa 不变, 然后在保持 p , b 和 α 的值不变条件下增加剪应力 q , 直至试样破坏。

2.2 不同剪应力水平下应力单纯旋转路径

该组试验主要研究在不同剪应力水平下经历大主应力单纯旋转后再剪切的条件下原状软黏土的小应变刚度特性, 分析应力旋转阶段剪应力水平的影响。分别开展了剪应力 $q=5, 25$ 和 50 kPa 条件下的应力纯旋转试验, 旋转角度为 80° , 中主应力系数 b 都为 0.5 。应力路径的参数设置如表 3 所示。

试样固结完成后, 先调节参数 q 和 b 到初始值, 然后 α 从 0 旋转到 80° , 最后在保持 p , b 和 α 不变条件下增加剪应力 q , 直至试样破坏。

表 3 应力纯旋转试验方案

Table 3 Pure principal stress rotation test

编号	q_0/kPa	b	$\alpha/(^{\circ})$
R101	5	0.5	80
R102	25	0.5	80
R103	50	0.5	80

2.3 应力往复旋转应力路径

该组试验主要研究经历大主应力往复循环旋转后对原状软黏土刚度特性的影响。分别开展了大主应力方向在 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 和 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 区间内往复旋转的试验, 旋转阶段剪应力 $q_0=25$ kPa。同时也考虑了中主应力系数 b 的影响, 试验方案如表 4 所示。试样完成固结后, 先调节参数 q 和 b 到设定值, 然后保持 p , q 和 b 不变, 大主应力方向角在设定区间内往复循环旋转 8 次, 最后试样 CR1 沿 $\alpha=45^{\circ}$ 方向剪切至破坏, 而试样则 CR2 和 CR3 在 $\alpha=90^{\circ}$ 方向剪切至破坏。

表 4 应力往复旋转试验方案

Table 4 Repeated principal stress rotation test

编号	q_0/kPa	b	$\alpha/(^{\circ})$
CR1	25	0.5	$0 \sim 45$
CR2	25	0.5	$45 \sim 90$
CR3	25	0	$45 \sim 90$

与常规三轴试验不同, 空心圆柱扭剪试样受到 4 个独立应力分量的作用, 产生相应的应变。仅采用某一应力应变分量关系曲线不能很好地描述土体的受力变形状态。因此, 本文参考 Zdravkovic 等^[17]的方法采用八面体剪应力 q_{oct} 和八面体剪应变 ε_{oct} 来描述这一复杂应力状态下软黏土的特性。其中:

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4(\varepsilon_z^2 + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_{\theta}^2) + 3\gamma_{z\theta}^2 - 4(\varepsilon_z \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z \varepsilon_r + \varepsilon_r \varepsilon_{\theta})}, \tag{1}$$

$$q_{\text{oct}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{z\theta}^2 - \sigma_z\sigma_\theta - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta} \quad (2)$$

式中, σ_z , σ_r , σ_θ 和 $\tau_{z\theta}$ 分别为轴向、径向、环向及扭剪应力, ε_z , ε_r , ε_θ 和 $\gamma_{z\theta}$ 分别为对应的应变。

3 应力应变关系分析

图 4 给出了大主应力沿不同方向对原状黏土试样进行剪切试验的 $q_{\text{oct}} - \varepsilon_{\text{oct}}$ 关系曲线。从图 4 中可以看到原状土样在不同方向上的应力 - 应变关系曲线的变化规律基本相同。剪切初期应力 - 应变近似为线性关系, 随着应力的增加, 应变的增加较为缓慢, 即土体表现为较大的刚度。随着应力的进一步增加, 应力 - 应变曲线的非线性特性逐渐显著, 应变开始快速增加, 曲线斜率也逐渐减小。剪切后期应力基本不再增加, 而应变则迅速增加直至试样破坏, 试样表现为较显著的塑性破坏特征。

从图 4 中可以看到原状软黏土在不同方向上的破坏强度存在显著的差异。沿 45° 方向剪切时原状软黏土的强度最大, 而沿 30° 方向的强度最低, 其他各方向的强度都有较大差异。当沿 90° 方向剪切时, 试样表现出一定的软化特性, 此时, 试样表现为轴向伸长变形。

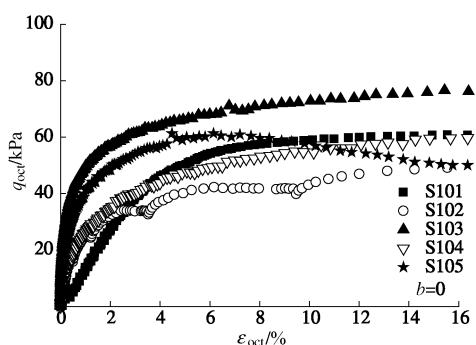


图 4 沿不同方向八面体应力应变关系曲线

Fig. 4 Curves sheared in various directions

图 5 给出了不同 b 值条件下原状软黏土定向剪切时的应力应变关系曲线。该组试验都剪切至 $q=37.5$ kPa, 试样未剪切至破坏, 主要关注软黏土较小应变范围内应力 - 应变及刚度特性。从图中可以看到剪切初始阶段 (应变 $< 0.1\%$ 时), 应力应变近似呈线性关系, 随着应力的增加, 应力应变曲线逐渐表现为非线性特性。对比图中的曲线可以发现, 中主应力系数对原状黏土应力应变曲线有一定的影响, 同一剪应力水平下, $b=0$ 时原状黏土的应变最小, 而 $b=1$ 时原状黏土的应变最大。

图 6 给出了第二组试验在不同剪应力水平下主应力轴单纯旋转及旋转后定向剪切过程中原状软黏土的

应力 - 应变关系曲线。

从图中可以看到, 应力方向单纯旋转也会引起软黏土的变形。试样 R103 在 $q=50$ kPa 下主应力单纯旋转过程中试样产生的变形最为显著 (曲线水平段), 旋转阶段应变增量为 2.575% , 是初始剪切阶段 (q 增加到 50 kPa) 的 3.7 倍。试样 R102 在纯旋转阶段产生的应变增量为 0.095% , 与初始剪切阶段的应变基本相同。而 R101 在 $q=5$ kPa 下大主应力纯旋转阶段引起的应变很小, 仅为 0.015% , 即在该应力条件 ($q=5$ kPa) 下应力方向的旋转对土体变形基本没有影响。该组试验表明应力方向单纯旋转引起土体应变的大小与剪应力水平有关, 剪应力水平越大经历相同幅度的应力方向旋转引起的应变也越大。

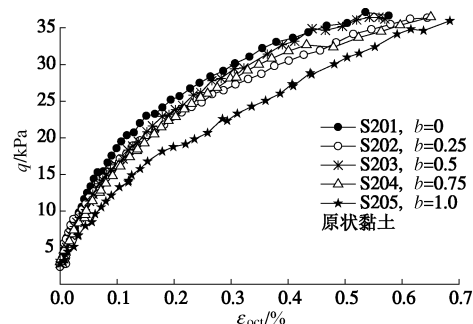


图 5 不同 b 值条件下原状黏土应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of soft clay with various values of b

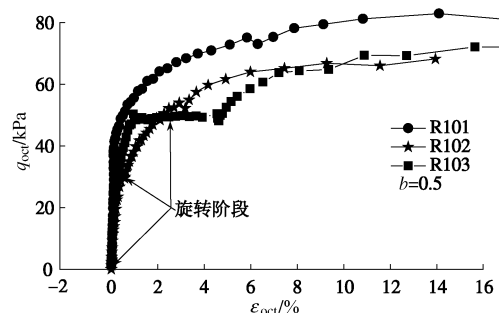


图 6 应力纯旋转路径下应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of pure principal stress rotation tests

对比图中 R101 和 R102、R103 的曲线可以发现, 试样 R102、R103 的最终强度基本相同但显著低于试样 R101。这说明在剪应力较大时应力方向的旋转会使土体强度显著减小。

图 7, 8 分别给出了主应力往复循环旋转阶段和后期定向剪切阶段原状软黏土应力 - 应变关系曲线。虽然旋转阶段剪应力 q 都为 25 kPa, 但由于中主应力系数的不同, 试样 CR2 ($b=0.5$) 和 CR3 ($b=0$) 的八面体剪应力并不相同 (式 (2))。相应的主应力在相同的区间内 ($45^\circ \sim 90^\circ$) 往复旋转 8 次后, 试样 CR3 累

积的应变值大于试样 CR2。其他条件相同时, 应力方向在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 区间内往复旋转 (CR1) 累积的应变也要小于在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 区间内 (CR2) 往复旋转累积的值。往复旋转结束时累积的应变值 $< 1\%$ 。这表明主应力循环旋转区间对软黏土应变累积有较显著影响, 这也说明土体在不同方向上材料特性的差异, 即原状黏土存在显著各向异性特性。

旋转结束后的定向剪切阶段, 在 $b=0.5$ 时沿 90° 剪切的强度较沿 45° 剪切时高, 这与第一组 $b=0$ 的定向剪切试验结果不同。这说明中主应力系数及应力往复旋转对原状黏土强度各向异性产生较显著影响。

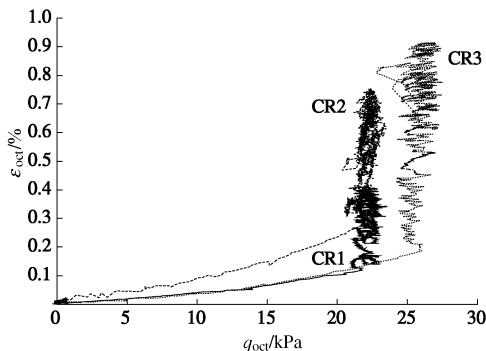


图7 应力往复旋转阶段应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves during cyclic principal stress rotation

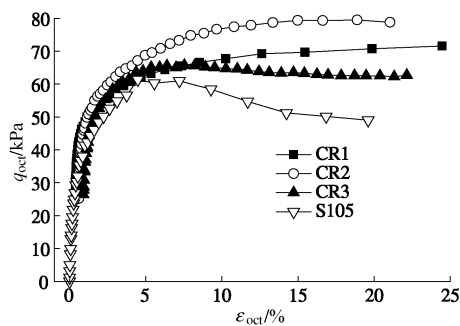


图8 经历应力往复旋转后定向剪切应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves after cyclic principal stress rotation

图8中也给出了试样 S105 的应力-应变曲线。在 $b=0$, $q=25$ kPa 时试样 CR3 经历主应力往复旋转后沿 90° 的定向剪切强度高于未经历主应力往复旋转的试样 S105。应变曲线也表现出相同的应变软化特性。这说明较低剪应力水平下经历主应力往复旋转后使原状黏土的强度得到一定的提高。事实上经历主应力轴往复旋转过程中试样经历了循环加载和卸载作用, 从第二个循环开始试样就表现为较显著的弹性特性, 应变基本不再累积。经历主应力轴往复旋转 8 个循环后, 试样 CR1, CR2 和 CR3 的应变累积值分别为 0.368%, 0.618% 和 0.903%。试样 CR2 的强度要高

于 CR3, 并且没有应变软化的趋势, 这说明中主应力系数 b 对软黏土的强度有显著影响。

4 应力旋转对黏土刚度的影响

空心圆柱试样与常规三轴试样不同, 单元体受到 4 个独立应力分量的作用, 试样处于复杂应力状态。所以试验结果分析时参考 Zdravkovic 等^[17]的研究成果, 本文采用八面体剪应力-剪应变曲线的切线刚度 G_{oct} 来描述复杂应力条件下软黏土的刚度特性, 综合考虑各应力应变分量的影响。

$$G_{oct} = \frac{dq_{oct}}{d\varepsilon_{oct}}, \quad (3)$$

式中, dq_{oct} 和 $d\varepsilon_{oct}$ 分别为八面体剪应力和八面体剪应变增量。本文重点关注的是试样小应变阶段的刚度特性, 此时试样的变形很小, 且刚度乳胶膜的模量, 乳胶膜对试样的影响相对较小。因此本文试验结果分析中未考虑乳胶膜影响的修正。

图9给出了原状黏土沿不同方向剪切时, 切线刚度随剪应变的变化曲线。从图9中可以看到曲线存在显著的非线性, 土体刚度受应变大小的影响非常显著, 随着应变的增加, 切线刚度不断减小, 并最终趋于稳定。在应变小于 0.01% 和大于 0.1% 时原状黏土刚度的变化相对较小。原状黏土刚度在 0.01%~0.1% 应变区间内的衰减最为显著, 而应变大于 1% 后土体的刚度基本保持不变, 但仅为剪切开始时的 10% 左右。这说明在复杂应力条件下原状黏土的小应变刚度特性也很显著。

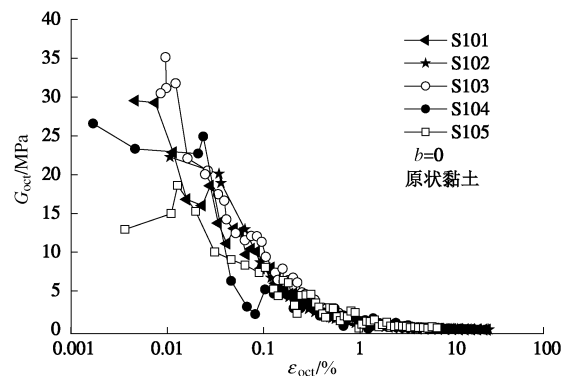


图9 定向剪切时 $G_{oct} - \lg \varepsilon_{oct}$ 曲线

Fig. 9 $G_{oct} - \lg \varepsilon_{oct}$ curves of fixed direction tests

图9表明剪切方向对原状黏土切线刚度有一定影响, 但与剪切强度相比土体刚度受剪切方向的影响相对不显著。而谷川等^[8]进行的三轴应力路径试验发现, 三轴应力路径旋转对黏土割线模量的影响比强度更显著。这主要是由于两种试验路径的加载方式存在显著的不同。本文试验结果主要体现了原状黏土刚度的初始各向异性特性。

图 10 为不同 b 值条件下原状黏土 $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$ 曲线。从图 10 中可以看到不同 b 值条件下沿原状软黏土沉积方向 ($\alpha=0^\circ$) 剪切时, 切线刚度的变化规律相同, 随着剪应变的增加, 切线刚度都不断减小。在小应变 ($<0.1\%$) 阶段中主应力系数对原状软黏土的切线刚度有较显著的影响。 $b=0$ 时原状软黏土的切线刚度最大, 而 $b=1$ 时的切线刚度最小。这与剪应力 - 剪应变关系曲线的变化规律是一致的。

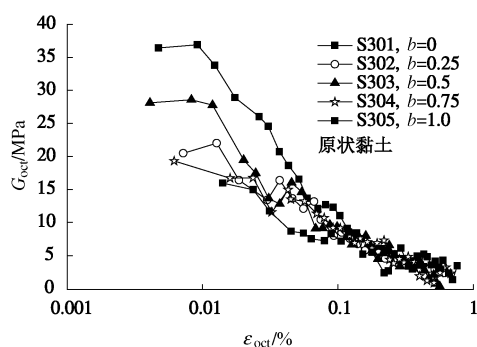


图 10 不同 b 值条件下原状黏土 $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$ 曲线

Fig. 10 $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$ curves of various values of b

图 11 给出了经历不同剪应力水平下主应力轴单纯旋转后定向剪切阶段 (沿 $\alpha=80^\circ$ 方向) 原状软黏土的 $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$ 曲线。试样 R101 在 $q=5$ kPa 时大主应力旋转 80° 后, 进行定向剪切。试样 R102 和 R103 则分别在 $q=25$ kPa 和 $q=50$ kPa 条件下主应力轴旋转 80° 后, 再进行定向剪切。

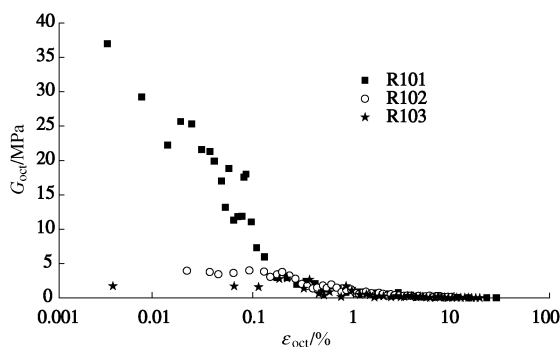


图 11 主应力单纯旋转对原状黏土刚度影响

Fig. 11 Influence of pure stress rotation on $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$

由于旋转过程中已经累积了部分剪应变 (图 6), 此时再进行定向剪切时, 土体的切线刚度已经发生衰减。从图 11 中可以看到, 试样 R102 和 R103 在经历应力旋转后, 剪切初期小应变阶段的刚度就已经很低。而试样 R101 在旋转阶段累计的应变很小, 前期应力方向的旋转历史对原状黏土后期剪切阶段刚度的影响不显著。所以应力方向旋转对土体刚度的影响主要体现在, 应力方向旋转引起的应变累积使土体刚度的衰减。应变累积越显著, 刚度的衰减也越明显。已有的

研究也表明应力旋转引起的应变累积值受旋转过程中剪应力水平的控制。因此, 该组试验结果表明剪应力水平较高时经历主应力大幅度连续单纯旋转后原状软黏土的刚度会产生显著的衰减。

图 12 为经历应力往复旋转后再定向剪切时原状黏土的 $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$ 曲线。主应力往复旋转阶段试样也累积了部分应变, 但试样经历循环加卸载后原状黏土的强度反而有一定程度的提高 (图 8), 再进行定向剪切时, 土体的切线刚度依然较高, 并没有显著的衰减。

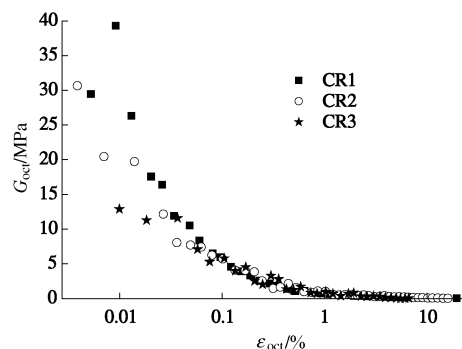


图 12 应力往复旋转对黏土刚度的影响

Fig. 12 Influence of cyclic stress rotation on $G_{\text{oct}} - \lg \varepsilon_{\text{oct}}$

该组试验结果与主应力单纯连续旋转试验结果的对比表明, 除了应变累积外, 应力方向的旋转模式对软黏土刚度有很大影响。此外对比该组试样刚度衰减曲线, 可以发现经历应力往复循环旋转后, 剪切方向以及中主应力系数对原状黏土刚度的影响也相对不显著。

5 结 论

本文通过对杭州软黏土开展的系列应力旋转路径下的试验, 重点分析了沿与沉积方向不同角度剪切、经历主应力连续单纯旋转以及往复循环旋转后软黏土的刚度特性。基于试验研究的结果得到以下结论:

(1) 原状黏土存在显著的强度各向异性, 沿与原状黏土沉积方向不同角度剪切时, 土体的强度差异显著。中主应力系数对原状黏土应力应变关系也有显著影响。

(2) 随着剪应变的增加, 黏土刚度变化的规律基本相同, 在应变 $<0.01\%$ 时表现为很高的剪切刚度, 在 $0.01\% \sim 0.1\%$ 范围内刚度急剧衰减, 应变大于 1% 之后刚度则基本保持不变。与剪切强度相比, 黏土的刚度特性受剪切方向的影响相对较小。

(3) 中主应力系数对小应变范围内黏土刚度也有一定的影响。 $b=0$ 时原状软黏土的切线刚度最大, 而 $b=1$ 时的切线刚度最小。

(4) 主应力单纯连续旋转也会使软黏土产生显著

的变形, 且随着旋转过程中剪应力的增加, 应力旋转引起的应变越显著。经历应力旋转后由于变形的累积, 土体的刚度会产生显著的衰减。主要受累积应变大小的影响。

(5) 经历应力往复循环旋转后, 原状黏土表现为一定的弹性特性, 强度和刚度都有一定程度的提高, 而剪切方向与主应力系数的影响则趋于不显著。

参考文献:

- [1] BURLAND J B. Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**(4): 499 - 514.
- [2] JARDINE R J. One perspective of the pre-failure deformation characteristics of some geomaterials[C]// Proceedings of the International Conference on the Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Hokkaido, 1995: 855 - 885.
- [3] SCHADLICH B, SCHWEIGER H F. Influence of anisotropic small strain stiffness on the deformation behavior of geotechnical structures[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, **13**(6): 861 - 868.
- [4] HSIEH P G, OU C Y. Analysis of nonlinear stress and strain in clay under the undrained condition[J]. Journal of Mechanics, 2011, **27**: 201 - 213.
- [5] 吕高峰, 魏庆朝, 倪永军. 考虑土体小应变特性的浅埋暗挖地铁隧道施工扰动影响的数值分析[J]. 中国铁道科学, 2010, **31**(1): 72 - 78. (LÜ Gao-feng, WEI Qing-chao, NI Yong-jun. Numerical analysis on the construction disturbance of shallow excavation tunnelling considering small strain behavior of soil[J]. China Railway Science, 2010, **31**(1): 72 - 78. (in Chinese))
- [6] 张培森. 小应变条件下应力路径旋转对剪切模量影响[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 821 - 824. (ZHANG Pei-shen. Effect of stress path circumgyration on shear modulus under small strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 821 - 824. (in Chinese))
- [7] LINGS M L, PENNINGTON D S, NASH D F T. Anisotropic stiffness parameters and their measurement in a stiff natural clay[J]. Géotechnique, 2000, **50**(2): 109 - 125.
- [8] 谷川, 王军, 张婷婷, 等. 应力路径对饱和软黏土割线模量的影响[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3394 - 3402. (GU Chuan, WANG Jun, ZHANG Ting-ting. Influence of stress path on secant modulus of soft saturated clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3394 - 3402. (in Chinese))
- [9] ATKINSON J H, SALLFOR G. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests[C]// Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence, 1991: 915 - 956.
- [10] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [11] 张培森. 小应变条件下土体刚度影响因素分析[J]. 西部探矿工程, 2007(11): 1 - 4. (ZHANG Pei-shen. Effect factors of soil's stiffness under small strain[J]. West-china Exploration Engineering, 2007(11): 1 - 4. (in Chinese))
- [12] ARTHUR J R F, CHUA K S. Principal stress rotation: A missing parameter[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, **106**(4): 419 - 433.
- [13] NAKATA Y, HYODO M. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(2): 115 - 128.
- [14] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. Géotechnique, 2007, **57**(4): 371 - 384.
- [15] AKAGI H, YAMAMOTO H. Stress-dilatancy relation of undisturbed clay under principal axes rotation[J]. Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, 1997: 211 - 216.
- [16] 沈杨. 考虑主应力方向变化的原状软黏土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (SHEN Yang. Experimental study on effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [17] ZDRAVKOVIC L, JARDINE R J. Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions[J]. Géotechnique, 1997, **47**(3): 407 - 437.